

Title	Surface modification and mechanical reliability enhancement of free-standing single crystal silicon microstructures using localized KrF excimer laser annealing( Abstract_要旨 )
Author(s)	Mitwally, Mohamed Elwi
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2015-05-25
URL	<a href="http://dx.doi.org/10.14989/doctor.k19184">http://dx.doi.org/10.14989/doctor.k19184</a>
Right	許諾条件により本文は2016-04-01に公開
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士（工学）	氏名	Mohamed Elwi Mitwally
論文題目	Surface modification and mechanical reliability enhancement of free-standing single crystal silicon microstructures using localized KrF excimer laser annealing （単結晶シリコン自立マイクロ構造の KrF エキシマレーザ局所アニールによる表面改質および機械的信頼性向上）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、単結晶シリコン自立マイクロ構造体の表面を KrF エキシマレーザで局所アニールする新しい表面改質方法を考案し、引張試験、及び共振振動疲労試験によるその機械的信頼性の向上を論じた結果をまとめたものであって、8 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の背景及び目的について述べている。</p> <p>第 2 章では、微小電気機械システム（MEMS）の主要な構造材料であるシリコンの機械的物性について、特に引張強度と疲労寿命についてまとめ、これらの機械的信頼性を支配するパラメータを抽出している。文献調査から、シリコン自立マイクロ構造の強度、疲労寿命は寸法効果、結晶方位、環境の影響と並んで、半導体微細加工プロセスのプラズマエッチングで形成されるシリコン構造体の表面粗さ、特にプラズマエッチング加工面である構造体側面の表面粗さが強く影響し、表面、側面の表面改質が信頼性向上に必要であることを指摘している。</p> <p>第 3 章では、単結晶シリコン構造体加工面の表面粗さを改善・改質する手法について文献調査を行い、本研究の目的に最適な手法を選定している。ウェットエッチング、熱酸化、水素中高温アニール、レーザアニールが用いられていることを示したうえで、本研究が目指す機械的信頼性の向上のためには、デバイスを構成する構造体を可動構造として完成させた後にその機能を損なわずに表面粗さを改善・改質する手法が必要であり、局所処理が可能なレーザアニールが最適であると結論づけている。</p> <p>第 4 章では、実験方法を示している。本研究では KrF エキシマレーザを 2.5mm 角の領域に均一に照射可能で、メタルマスクを用いた局所アニールが可能な実験装置を用いている。まず、評価対象である単結晶シリコン試験片の作製方法を、さらに機械的信頼性評価のための引張試験、疲労試験方法を示している。そして、アニール装置を用いてマイクロ構造の側面を斜めから照射する手法を提示した上で、機械的信頼性を改善するための最適アニール条件探索実験の手順を説明している。</p> <p>第 5 章では、厚さ 5 μm、幅 5～10 μm の単結晶シリコン片持ち梁構造において、デバイス動作時に高い応力が印加される領域を局所的に高信頼化することを考慮して、その側面を最大 65 度の角度からレーザ照射、アニールした結果を示している。、まず、高い応力が印加される梁部のみに局所照射することで、壊れやすいマイクロ構造を照射による衝撃で破壊させることなく、比較的高いエネルギー(4 J/cm<sup>2</sup>)でもアニール可能であることを示した。また、照射エネルギー、照射回数を変化させ、表面改質の最適条件を探索した。表面粗さは照射エネルギー量に強く依存し、照射回数の影響は小さいことを明らかにした。照射量 1.2～2.4 J/cm<sup>2</sup> では構造の形状を大きく変化させることなく表面粗さを改善できること、2.4～4 J/cm<sup>2</sup> では断面形状が大きく変わるが表面粗さをさらに改善できること、を示した。</p> <p>第 6 章では、前章で明らかになった最適なアニール条件(1.6～4 J/cm<sup>2</sup>)を用いて幅、厚さ 5 μm、長さ 120 μm の引張軸方位&lt;110&gt;の単結晶シリコン試験片の単軸引張強度を評価した。4J/cm<sup>2</sup> の比較的高い照射エネルギーでは、平均引張強度が 4 GPa とアニール前よりも 30%程度向上した。しかし、アニール前は正方形であった断面形状がほぼ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	Mohamed Elwi Mitwally
<p>円形となり、デバイスの動作を大きく変化させてしまう懸念がある。一方、<math>1.6 \text{ J/cm}^2</math>の低い照射エネルギーでは 6%程度の強度の改善を確認した。同様に引張軸方位&lt;100&gt;の試験片についても <math>4 \text{ J/cm}^2</math>の照射条件で引張強度が 30%向上し、アニールによる強度改善の効果が結晶方位に依存しないことを示した。</p> <p>第 7 章では、厚さ <math>5 \mu\text{m}</math> の単結晶シリコン膜の面内曲げ振動子構造の支持梁部にアニールを行い、疲労試験を行った結果を報告している。この振動子は、扇形の錘を梁で支持し、静電力で面内共振振動を励振する。梁中央には応力集中させるための切欠きが形成されている。この切欠き部にレーザアニールを行い、疲労寿命の表面改質による疲労寿命改善を評価した。破壊の起点となる切欠き先端の表面粗さを改善できることを示したが、試験片によってはクラック様の表面形状が創製されることがあった。このため、疲労寿命は、アニール前に対して長寿命となったものと短寿命になったものがあり、大きくばらついた。長寿命化したものはアニール前に対して数倍の疲労寿命となったが、初期破壊する試験片もあった。これより、提案手法は引張試験片のような凹部のない形状の表面改質には効果的であったが、切欠き部の表面改質による機械的信頼性改善効果については、可能性は示せたが再現性に課題が残ると結論づけている。</p> <p>第 8 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、微小電気機械システム(MEMS: Micro Electro Mechanical Systems)技術で作製されるセンサやアクチュエータに用いられる単結晶シリコン構造の機械的信頼性の向上を目的として、マイクロスケールのデバイス構造体を作製したのちに加工プロセスの結果として発生した表面荒れを局所エキシマレーザアニールによって除去する表面改質方法を提案し、引張強度、疲労寿命の向上効果を明らかにした結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 単結晶シリコンの自立マイクロ構造において、表面粗さを改善して機械的信頼性を向上させる手法として局所エキシマレーザアニールが有効であることを明らかにした。局所アニールを用いることで、厚さ 10  $\mu\text{m}$ 、幅 5～10  $\mu\text{m}$  断面の梁構造を破壊することなく、4  $\text{J}/\text{cm}^2$  の高いエネルギーでの照射が可能であった。
2. 単結晶シリコン自立マイクロ構造の表面粗さは照射エネルギーに依存し、また断面形状も変化することが明らかになった。照射量 1.2～2.4  $\text{J}/\text{cm}^2$  では構造の形状を大きく変化させることなく表面粗さを改善できること、2.4～4  $\text{J}/\text{cm}^2$  では断面形状が大きく変わるが表面粗さをさらに改善できること、を示した。
3. 引張軸方位が<110>および<100>の単結晶シリコン梁の引張強度は照射エネルギー4  $\text{J}/\text{cm}^2$  のアニールで 30%向上したが、断面形状に大きな変化があった。1.6  $\text{J}/\text{cm}^2$  の低照射エネルギーでアニールした場合、断面形状を保ちつつ引張強度が 6% 向上した。本手法でシリコン構造体の強度向上が可能であることを明らかにした。
4. 切欠き部を有する試験片の共振振動疲労試験による疲労寿命測定では、寿命が 3～4 倍に向上する試料もあったが、寿命のばらつきが大きかった。これより、切欠き部のような不均一にアニールされる部位の表面粗さ改善にはさらなる検討が必要であると結論づけた。

以上、本論文は、MEMS 技術を用いて作製される単結晶シリコンの自立マイクロ構造体の機械的信頼性を向上するという課題に対して、KrF エキシマレーザを斜め方向から照射する表面改質手法を提案し、単結晶シリコン自立マイクロ構造の引張強度、疲労特性の改善を示したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 4 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。